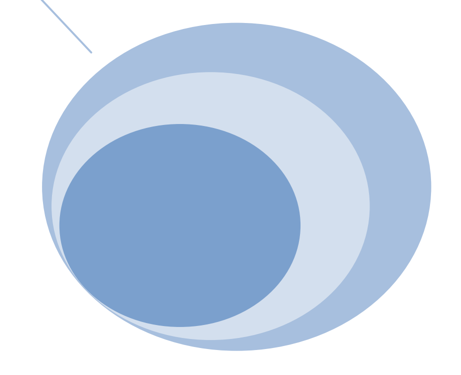
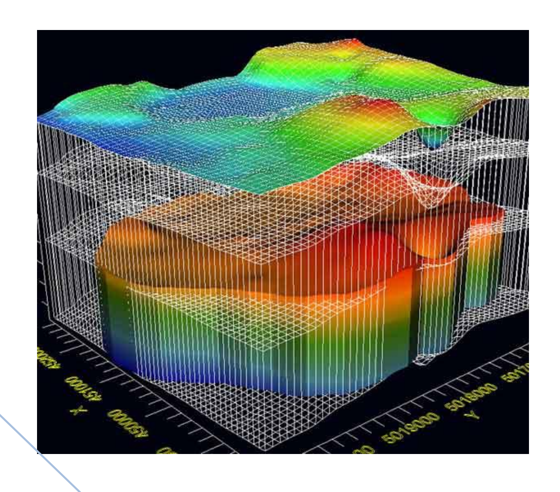
CHATELUS Maxence
DESPLANQUES Thibault

Master 2ème année Gestion de projets
Hydrotechnologiques & environnementaux



Gestion de la nappe alluviale de la Siagne







Responsables :

Mr. BOURGEOIS
Responsable Innovation et Développement Durable,
Lyonnaise des Eaux, Mougins

Mr. LACROIX
Professeur d'Hydrogéologie,
Polytech' Nice – Sophia Antipolis





SOMMAIRE

TABLE DES FIGURES

Introduction

Le présent rapport est le fruit d’une collaboration entre la Lyonnaise des Eaux et le master Hydroprotech de Polytech’Nice-Sophia. En effet, ces deux entités développent actuellement un partenariat dont l’une des implications est l’accomplissement de projets pédagogiques réalisés par des étudiants volontaires pour la Lyonnaise des eaux. Cette démarche permet de rapprocher les étudiants du monde de l’entreprise en leur permettant de travailler sur des projets concrets les préparant au milieu professionnel.

La thématique générale est le développement de la réutilisation des eaux usées traitées, communément appelée « re-use », principe auquel la Lyonnaise des Eaux s’intéresse particulièrement.

L’objet de l’étude est le suivant : La Lyonnaise des Eaux est en ce moment en train de construire une nouvelle station de traitement des eaux usées pour le bassin Cannois. Cette future station, baptisée « Aquaviva », sera équipée d’une technologie de pointe d’ultrafiltration, le bio-réacteur à membranes. Cette technique performante permettra de rejeter une eau de bonne qualité, ultra-filtrée, ouvrant ainsi des perspectives de réutilisation de celle-ci.

D’autre part, La Siagne, cours d’eau alimentant le bassin cannois, est soumise indirectement aux pompages dans sa nappe alluviale, au point qu’en période estivale, pendant laquelle la demande en eau est à son maximum et les conditions météorologiques défavorables, son débit demeure insuffisant au vu de la loi sur l’eau 2006, imposant un « débit réservé à l’étiage » pour préserver l’équilibre écologique du milieu.
L’idée du projet est donc d’étudier la possibilité de réutiliser les eaux rejetées par la future station en les réinjectant dans la nappe alluviale pour limiter de manière diffuse la diminution du débit de la Siagne, et limiter la progression du biseau salé.

Pour mener cette étude, une modélisation de la nappe alluviale de la Siagne est nécessaire. Ce rapport et les données qui lui sont associées constituent une base sur laquelle ce projet de modélisation va pouvoir se poursuivre.

I. Description de notre système d'étude

1. Délimitation de la zone d'étude

La Siagne est un fleuve de 44,7 km de long, de sa source située au pied du massif de l'Audibergue (630m d'altitude) à son embouchure. Sa pente est forte sur 35,6km (jusqu'à 6%), pour s'établir sur les derniers kilomètres à 0.6%.

La Siagne dans ses derniers kilomètres de cours, correspondant à la basse vallée, est une rivière calme avec une très faible pente. Ses alluvions sont constituées, en majorité d'éléments fins : intercalations de niveaux sableux puis de niveaux argileux et de galets reposant sur des argiles bleues du Pliocène inferieur.

La nappe d'accompagnement de la Siagne en aval d'Auribeau représente 10 km² jusqu'à la mer, et environ 7 km2 en amont des captages de Mandelieu. En admettant une porosité de 5%, cette zone représente un stock de 350 000 m^3 d'eau par mètre de piézométrie. A l'échelle des mois touristiques de juillet et aout (62 jours), ce stock d'eau correspond à un débit de 65l/s

L'alimentation de la nappe libre se fait essentiellement à partir des infiltrations de la Siagne, à partir de l'infiltration directe des précipitations et à partir du ruissellement sur les gneiss alentours.

Pour pouvoir estimer avec précision les entrants de l'aquifère et délimiter le bassin versant nous nous limiterons à la surface alluvionnaire.

Pour évaluer cette surface nous avons collecté différentes données :

- Modèle numérique de terrain (MNT)
    - Mr ANDRES, communauté d'agglomération de Nice Côte d'Azur.
    - CRIGE, PACA.

- Ortho-photo
    - Mr LECUYER, directeur des systèmes d'informations géographique de la ville de Cannes.

Ces données nous permettraient, en les couplant avec une photo aérienne, de mesurer la surface plane jusqu'au affleurement des coteaux est et ouest.

- Carte géologique
    - BRGM Marseille, Mr DESSANDIER.

Nous avons pour le moment évalué notre surface à partir du logiciel AutoCad avec pour support une carte géologique. Elle correspond à une aire de 19.3 km².



Ci-dessous, une vue satellite de la zone d'étude avec référencés les sites importants de notre étude.

Figure 1. Vue satellite de la zone avec les différents points essentiels de l'étude

Légende :

1 : Seuil
2 : Station pompage Lyonnaise des Eaux site principal
3 : Station pompage Lyonnaise des Eaux site secondaire
4 : Station limnimetrique SISA
5 : Piézomètre télé-geré BRGM
6 : 3 anciens sites de pompages LDE
7 : Station d'épuration : AQUAVIVA

2. Présentation du cadre géologique

D'après une étude du BRGM *(B. DELLERY, G. DUROZOY et CL. GOUVERNET, 1965 - Données hydrogéologiques sur les basses vallées alluviales entre l'Esterel et le Var (Siagne, Brague, Loup et Cagne), BRGM, Faculté de sciences de Marseille)*, sur la plaine de la Siagne, de Pégomas à l'amont jusqu'à la côte, le contexte géologique est constitué globalement d'alluvions modernes, d'argiles et sables du Pliocène et de socle gneissique, comme le montre la carte géologique (figure 2).

Lors de la régression flandrienne, le lit de la Siagne a été entaillé jusqu'à une cote inférieure au 0 actuel. Des sondages effectués dans la vallée ont reconnu le Pliocène inférieur de -24,60m jusqu'à -70m (lieu dit « Les termes » (1025-2-60 cote + 2,60)), et au Moulin de Labadie (999-6-57), le Pliocène est rencontré jusqu'à -55,70m, puis le socle cristallin suit. Un comblement s'est ensuite effectué au fur et à mesure du relèvement du niveau de base.

La nappe alluviale de la Siagne est un aquifère qui se caractérise par un matériel alluvial hétérogène, alternant niveaux fins et imperméables et niveaux plus grossiers aquifères. On observe ainsi un compartimentage de la ressource en eau. Les alluvions s'appuient en rive droite sur les gneiss, et en rive gauche sur les argiles plaisanciennes, à intercalations de sables et poudingues, reposant elles-mêmes sur les gneiss.

L'aquifère est constitué de formations alluviales et colluviales généralement à granulométrie fine : limons sableux ou argilo-sableux à granulométrie homogène comportant localement des horizons de galets et graviers aquifères. La puissance des alluvions varie de 10 m à 30 m. Un niveau argileux d'une puissance variant de 3 m à 15 m, sépare localement cet aquifère en 2 unités distinctes (secteur de Mandelieu). Cette couche argileuse est cependant rarement compacte, et souvent sableuse. C'est donc une couche semi-perméable. Toutefois, afin de simplifier l'étude, nous pouvons négliger les apports transitant par cette formation, peu importants devant ceux des autres formations. Nous la considérerons donc comme imperméable.

Fig.5.2.1

ESQUISSE GÉOLOGIQUE DE LA BASSE VALLÉE DE LA SIAGNE

Terrasse ancienne

Pliocène

Permien et roches éruptives

Gneiss

Coupe géologique

Echelle : 1/50.000

Figure 2. Esquisse géologique de la basse vallée de la Siagne (source : *B. DELLERY, G. DUROZOY et CL. GOUVERNET, 1965 - Données hydrogéologiques sur les basses vallées alluviales entre l'Esterel et le Var (Siagne, Brague, Loup et Cagne), BRGM, Faculté de sciences de Marseille)*

Pour élaborer le modèle de la nappe, nous avons besoin de connaitre la profondeur de la couche imperméable. Nous avons donc dressé un inventaire de l'ensemble des forages et sondages, disponible sur le visualiseur « Infoterre » du BRGM *(http://infoterre.brgm.fr/viewerlite/MainTileForward.do),* avec des informations sur la géologie (cf. figures 3 et 4). Nous avons répertorié 96 points. Cet inventaire est restitué sur la feuille Excel « tableau_forages.xls » en annexe (cf. figure 5)

Profondeur	Formation	Lithologie	Lithologie	Stratigraphie	Altitude
3.00	Fz		Terre végétale vaseuse et graviers. Alluvions de la Siagne.	Holocène	14.00
5.00			Sable et graviers.		12.00
6.00			Graviers et sable limoneux.		11.00
10.00			Sable et graviers.		7.00
11.00			Argile grise et graviers.		6.00
16.00			Argile grise.		0.20

Figure 3. Lithologie extraite du forage n°09995X0019/F (Pégomas, S3 P3 zone amont). (source : BRGM, visualiseur InfoTerre, *http://infoterre.brgm.fr/viewerlite/MainTileForward.do*). On remarque que la couche d'argile grise se situe en ce point à une profondeur de 10/11m

Profondeur	Formation	Lithologie	Stratigraphie	Altitude
0.00 – 1.00	Fz	Terre végétale et graviers. Alluvions de la Siagne.	Holocène	15.00
1.00 – 4.00	Fz	Graviers.	Holocène	12.00
4.00 – 5.00	Fz	Sable et graviers.	Holocène	11.00
5.00 – 7.00	Fz	Sable.	Holocène	9.00
7.00 – 10.00	Fz	Graviers.	Holocène	6.00
10.00 – 12.00	Fz	Sable et graviers.	Holocène	4.00
12.00 – 20.00	Fz	Graviers (galets de calcaire gris ou de gneiss), peu de sable.	Holocène	-4.00

Figure 4. Lithologie extraite du forage n°09995X0020/F (S4 P4 (ZONE AMONT) ET P4 BIS) (source : BRGM, visualiseur InfoTerre, *http://infoterre.brgm.fr/viewerlite/MainTileForward.do*). On remarque qu'en ce point, la couche d'argile n'a pas été atteinte par le forage.

Identifiant infoterre	profondeur Couche imperméable	Couches aquifère
09995X0095/F	5,20 (argile)	Sable fin vaseux et racines+sable, gravier et blocs de gneiss
09995X0094/F2	10,30 (argile sableuse)	sables, graviers, galets
09995X0017/F	non atteinte (>22,10m)	sables, graviers, galets+Gneiss
09995X0025/F	non atteinte (>20m)	sables, graviers, galets
09995X0019/F	11m (argile grise)	sables et graviers
09995X0018/F	2,95 (argile sableuse grise)	terre végétales, sable, alluvions de la Siagne
09995X0020/F	non atteinte (>20m)	sables et graviers
09995X0039/S1	3m (argile sableuse brune, débris de coquillages et de végétaux)	Terre végétale sableuse, alluvions de la Siagne+sable argileux gris brun et galets roulés
09995X0022/F	non atteinte (>21m)	sable et graviers
09995X0026/S	7,50 (argile brune avec quelques galets. Traces de tourbe et graviers	terre végétale argileuses brune+morceaux de gneiss et galets calcaires emballés dans l'argile brune
09995X0047/P1	non atteinte (>25,50m)	Arène gneissique sablo-argileuse+sable silicieux très argileux
09995X0023/F	14m (argile grise)	sable, graviers et morceaux de gneiss
09995X0024/F	16,90m (argile grise compacte)	sable et graviers
09996X0211/S2	12,80m (argile grise vaseuse)	sable et galets
09996X0212/S1	non atteinte (>12m)	sable et galets
09996X0047/P	17,55 (argile sableuse grise)	sable argileux, galets, graviers
09996X0046/P	16,05 (argile sableuse)	sable argileux, galets, graviers
09995X0027/F	13,15 (marne grise plastique)	sable argileux, galets, graviers
09995X0021/F	1,10 (argile brune)	Terre végétale sableuse, alluvions de la Siagne
09996X0043/P	9,45m (argile peu sableuse)	sable moyen, graviers et galets

Figure 5. Extrait du tableau répertoriant l'ensemble des forages avec information sur la géologie du BRGM.

A ce stade, il est intéressant de tracer une carte avec les courbes isohypses du mur de l'aquifère (couche argileuse que nous considérons comme imperméable) à partir des données recueillies au sein du tableau Excel « tableau_forages.xls » en annexe. Nous avons pu la construire à partir des données de 65 points, référencés par leurs coordonnées Lambert II étendu, pour lesquelles la cote de la couche est connue (cf. figure 6). Grâce à cette carte, nous pouvons estimer la profondeur du mur en tout point (approximativement en procédant par interpolation entre deux isophyses), ce qui est nécessaire pour déterminer par la suite l'épaisseur de la nappe. La connaissance de cette épaisseur nous permettra de déterminer le volume d'eau retenu dans la nappe. Nous avons réalisé cette carte en entrant les valeurs de la cote NGF du mur de l'aquifère.

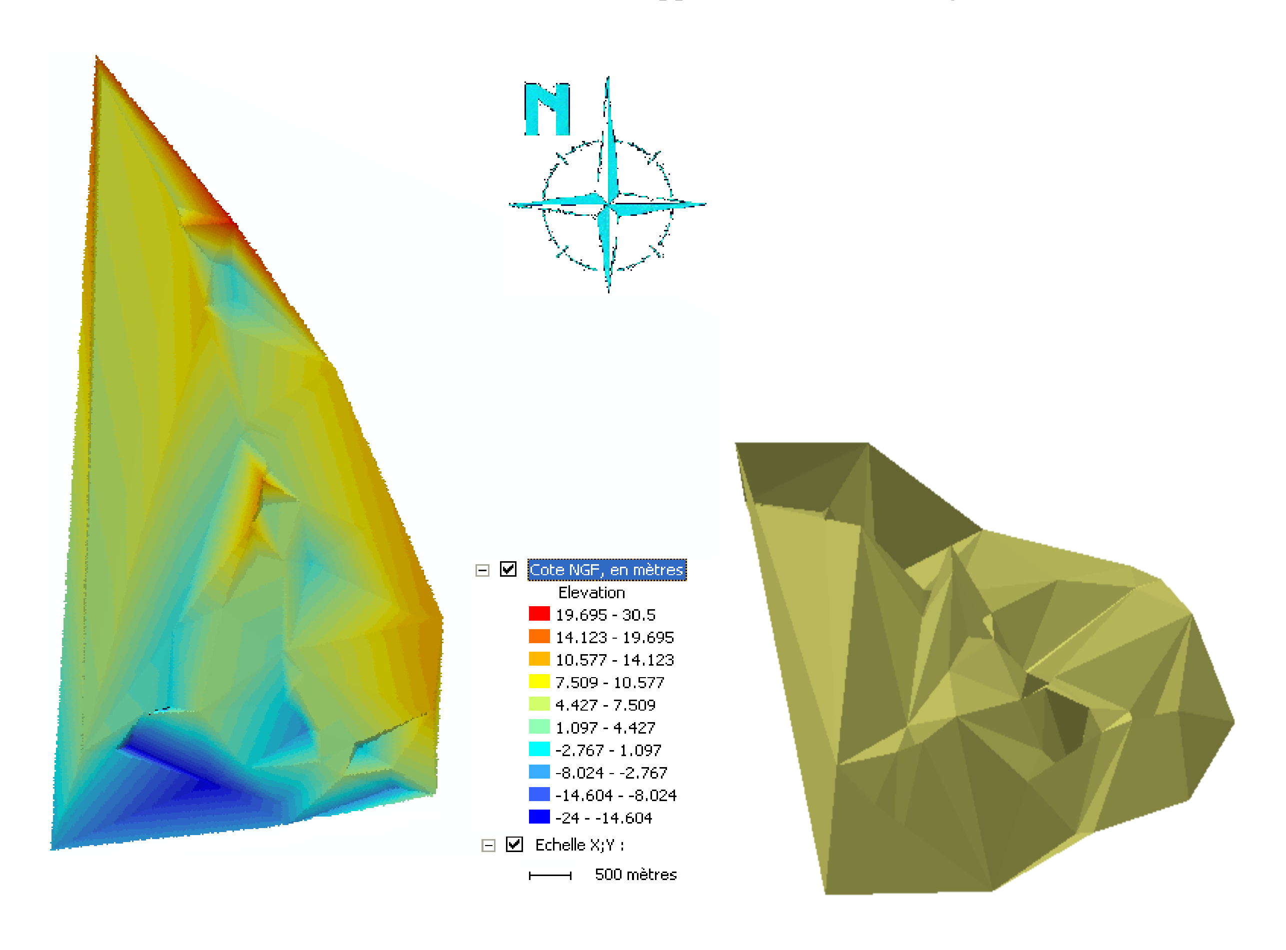


Figure 6. Projection plane, et vue 3D de la cote NGF du mur de l'aquifère réalisée sur ARCGIS

On notera qu'en certains points, le mur de l'aquifère n'a pas été atteint par les forages et est donc très profond. Les valeurs extrêmes ne peuvent donc pas être observées ici, puisqu'elles sont remplacées par des absences de valeur.

3. Caractéristiques hydrodynamiques et hydro-dispersives

Afin de pouvoir modéliser la nappe et lancer une simulation de comportement, il nous faut collecter un certain nombre d'informations sur les caractéristiques hydrodynamiques et hydro-dispersives de l'aquifère. Nous avons besoin de connaitre la porosité efficace, ainsi que la transmissivité ou la perméabilité.

- **Porosité efficace**

La porosité efficace est le volume d'eau qui est extrait par gravité, sur le volume total — et le milieu doit être initialement saturé en eau — cette définition exclut l'eau liée au sol. Elle est exprimée en pourcentage.

Une ancienne étude de modélisation de la nappe (ARLAB) a été réalisée en 1985. Celle-ci nous fournit quelques informations, notamment en ce qui concerne la porosité efficace.

D'après cette étude (*cf. ARLAB Eau et Environnement, Etude sur modèle de l'aquifère de la Siagne à l'aval d'Auribeau – Ajustement du modèle, fichier « Modélisation siagne_arlab 1985.pdf »*), la valeur de la porosité efficace est estimée à 0,05 (5%) pour la plupart de la zone d'étude sauf quelques mailles définies dans le tableau ci-dessous.

TABLEAU N 9

POROSITE EFFICACE
****

VALEUR UNIFORME =0.05

SAUF MAILLES SUIVANTES

416	417	423	424	429	430	435	436
441	442	448	449	458	459	460	468
	469	480	481	492	493	505	

POUR LESQUELLES =0.20

Figure 7. Tableau représentant les valeurs de la porosité efficace. (source : ARLAB Eau et Environnement, Etude sur modèle de l'aquifère de la Siagne à l'aval d'Auribeau – Ajustement du modèle, fichier « Modélisation siagne_arlab 1985.pdf »)

Ces numéros renvoient au maillage réalisé par l'étude ARLAB, disponible en annexe (fichier « planches modèle arlab.pdf »)

- **Transmissivité**

La transmissivité est un paramètre qui régit le débit d'eau qui s'écoule par unité de largeur de l'aquifère, sous l'effet du gradient hydraulique, incluant l'épaisseur de l'aquifère. Elle s'obtient en multipliant la perméabilité par la hauteur d'eau.
Des essais de pompages ont été réalisés en 1969, desquels ont été déduites des valeurs locales de transmissivité (cf. annexe « tableau_forages.xls »). Elles varient de 0,006 m^2/s à 0,35 m^2/s.

- **Perméabilité**

La perméabilité mesure la capacité du milieu à laisser passer l'eau. Cette valeur est directement liée à la transmissivité. L'un ou l'autre peut être utilisé. Elle s'obtient en calculant le rapport entre la transmissivité et la hauteur d'eau située au dessus du point de pompage utilisé pour obtenir la transmissivité.

- **Piézométrie**

Le niveau piézométrique en un point de l'aquifère est le niveau supérieur de la colonne d'eau statique qui équilibre la pression hydrostatique en ce point.
Un piézomètre est situé sur la nappe alluviale de la Siagne, au point de référence BRGM 09995X0028/F, dans la commune de Pégomas (le Boutéou MUL "F 6") (cf.figure 8). Il est télé-géré en temps réel.

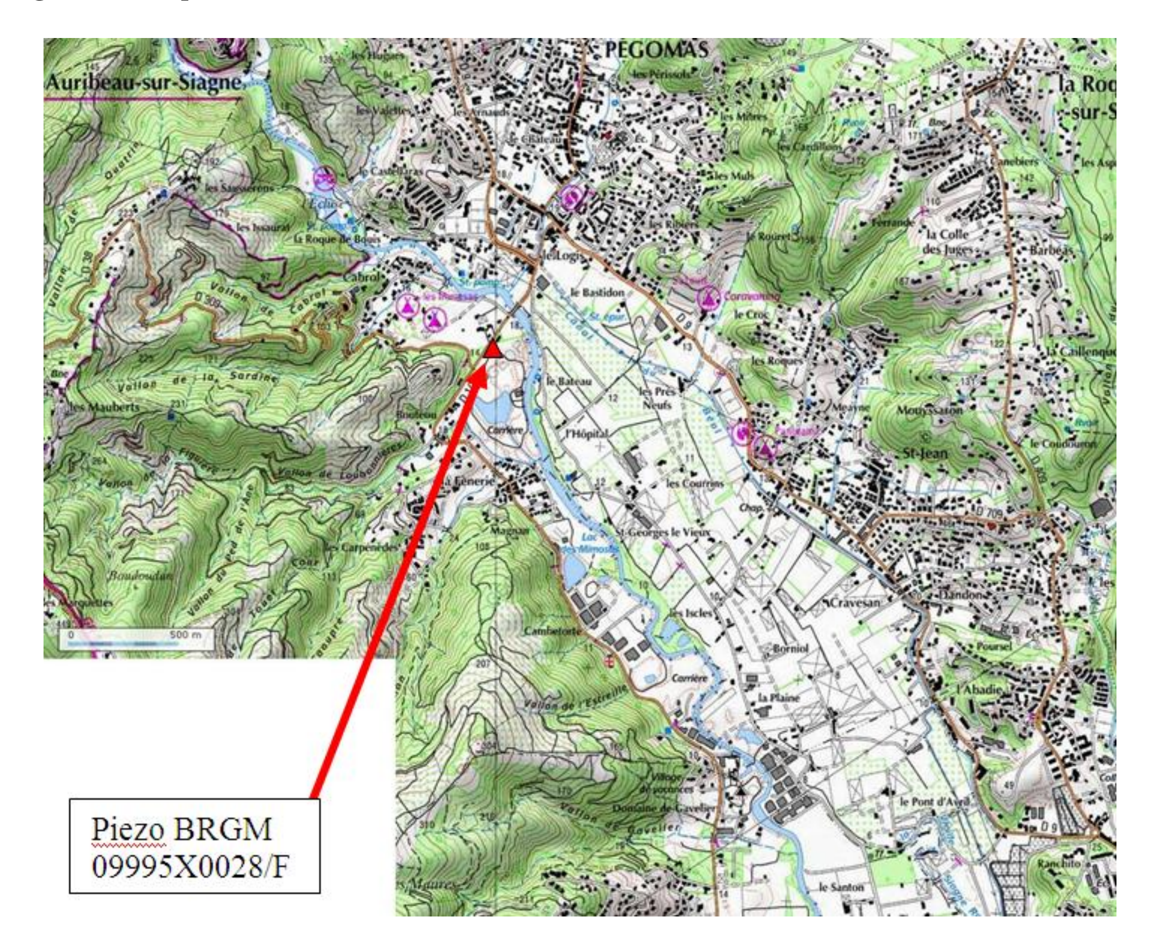


Figure 8. Carte topographique localisant le piézomètre (source : Lyonnaise des Eaux, 09-03x Données existantes sur la nappe de la Siagne en aval de Auribeau sur Siagne, fichier « 09-035 synthese Siagne.doc » en annexe.)



Les données sont fournies par le portail national ADES (Accès aux Données sur les Eaux Souterraines), et jointes en annexe à ce dossier *(cf. fichier « Export Données ADES\Quantité\chroniques.xls »)*. Ces données nous apprennent qu'en ce point, la profondeur de la nappe a oscillé ces 30 dernières années entre 2m et 5,5m, avec une moyenne de 4,1m. En 2010, le niveau a oscillé entre 2,5m et 4,5m, avec une moyenne de 3,91m. La piézométrie en ce point présente donc une très légère diminution, mais pas d'évolution significative par rapport aux fluctuations.

Le niveau de la nappe peut aussi être donné en cote NGF, comme sur le graphique représentant l'évolution du niveau de la nappe sur 6 ans (cf. figure 9).



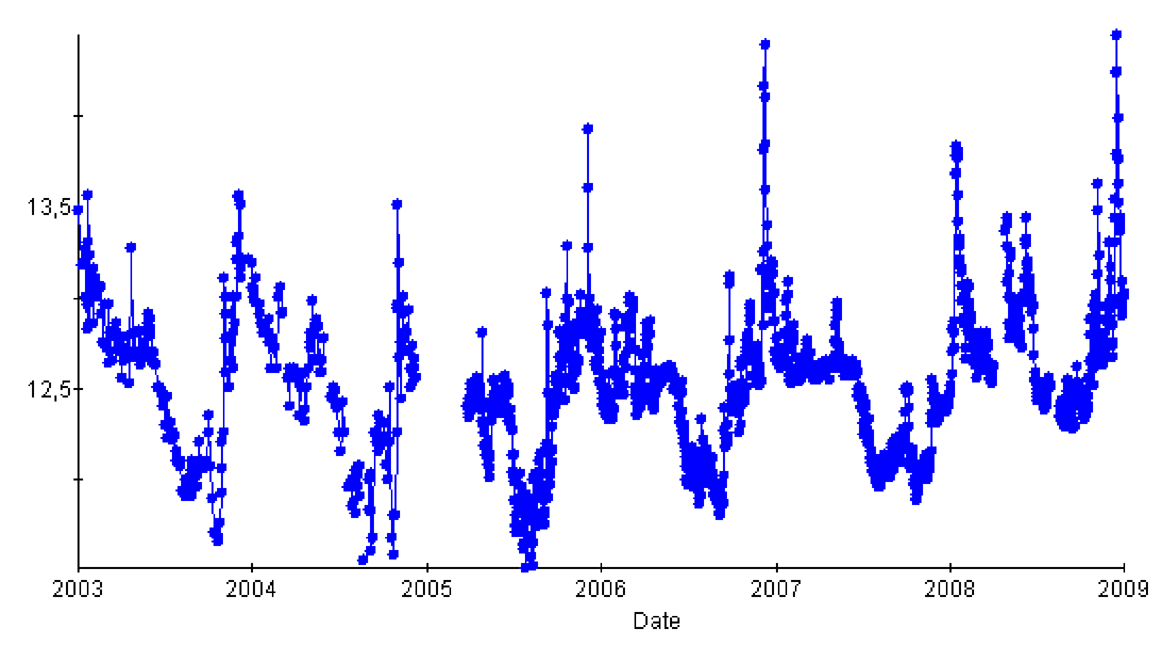


Figure 9. Evolution du niveau de la nappe entre 2003 et 2009 (source : Lyonnaise des Eaux, 09-03x Données existantes sur la nappe de la Siagne en aval de Auribeau sur Siagne, fichier « 09-035 synthese Siagne.doc » en annexe.)

Ce piézomètre nous permet d'avoir une vision du niveau de la nappe dans le temps.
En complément, nous avons une vision dans l'espace avec à disposition une carte du BRGM représentant la piézométrie (cf. figure 10). Elle est fondée sur une campagne de mesures réalisées sur la période mai-juin 1964 *(B. DELLERY, G. DUROZOY et CL. GOUVERNET, 1965 - Données hydrogéologiques sur les basses vallées alluviales entre l'Esterel et le Var (Siagne, Brague, Loup et Cagne), BRGM, Faculté de sciences de Marseille).* On peut déduire de cette carte les sens des écoulements dans la nappe qui sont représentés par des flèches.

Figure 10. Surface piezométrique de la nappe de la Siagne, mai-juin 1964

II. Les entrées et sorties du système

Pour comprendre le comportement de la nappe alluviale, il est indispensable de quantifier les différentes recharges de la nappe. Nous détaillerons les phénomènes d'infiltration directe des précipitations, les apports par ruissellement et les sorties du système d'étude. Pour finir, nous détaillerons les échanges entre la nappe et la rivière Siagne.

1. Recharge de la nappe

A) L'infiltration directe

La basse vallée de la Siagne étant très plane et la nappe alluviale étant libre, nous pouvons considérer que la recharge est égale à la pluie nette.

Nous avons estimé que le volume de recharge mensuelle était égal à la pluie mensuelle brute moins l'évapotranspiration.

Nous avons récolté les pluies mensuelles de la station météo de l'aéroport de Cannes, ainsi que l'évapotranspiration décadaire. Nous pouvons considérer ces valeurs comme représentatives sur l'ensemble de la basse vallée de la Siagne.
L'évapotranspiration est calculée, et non mesurée, à partir de la formule de Penman-Monteith. Le calcul se fait à partir des paramètres de base (température minimale, température maximale, vitesse moyenne du vent à 10 m ou 2m, tension de vapeur moyenne, insolation, rayonnement global), interpolés à l'aide des valeurs des 5 stations les plus proches, sans tenir compte de l'altitude.

Prenons l'exemple du mois de novembre 2010, avec de fortes précipitations. En effet, le total des précipitations de cette période peut dépasser la moitié du volume total annuel.
La pluie mensuelle est de 148mm et l'évapotranspiration mensuelle est de 24.7 mm.
La pluie nette est donc de 123.3 mm.
Nous devons prendre en compte l'imperméabilisation de la basse vallée. Nous prendrons un coefficient de 50% appliqué sur la zone allant de l'aéroport jusqu'au littoral (12.9 km²). Pour la partie nord de la basse vallée nous négligerons l'imperméabilité du fait de l'absence du réseau de collecte des eaux de pluies et de la forte densité de zones cultivées (6.4 km²).

L'infiltration mensuelle sera ainsi de 123.3 litres par m², sachant que notre surface alluvionnaire perméable est de 12.85 km², nous pouvons conclure que la recharge sur l'ensemble des alluvions sera de 52813 m^3 par jour.

Il sera intéressant de calculer précisément un coefficient de perméabilité détaillé de la zone d'étude.

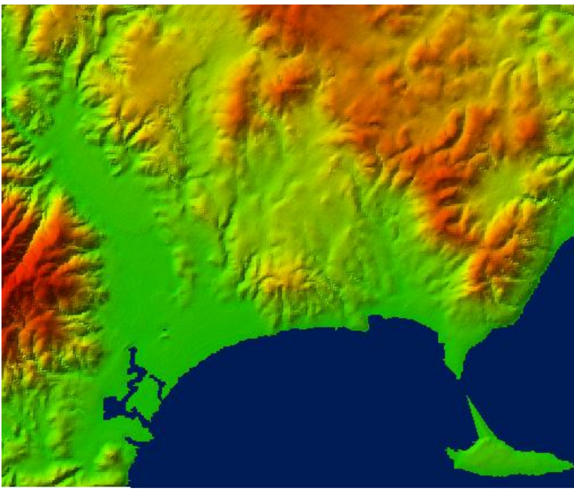


Figure 11. Projection plane de la zone d'étude, permettant de visualiser la partie plane où à lieu l'infiltration directe

B) L'influence des ruissellements

La plaine alluviale de la Siagne, entre Pégomas et le littoral, est bordée de versants offrant des conditions favorables au ruissellement.
En s'appuyant sur les études piézométriques réalisées par le bureau d'étude Arlab, nous remarquons que des ruissellements sur les coteaux ouest de la plaine affectent la piézométrie. *Référence :Arlab, Modélisation de la Siagne, « planche modèle Arlab.pdf »*

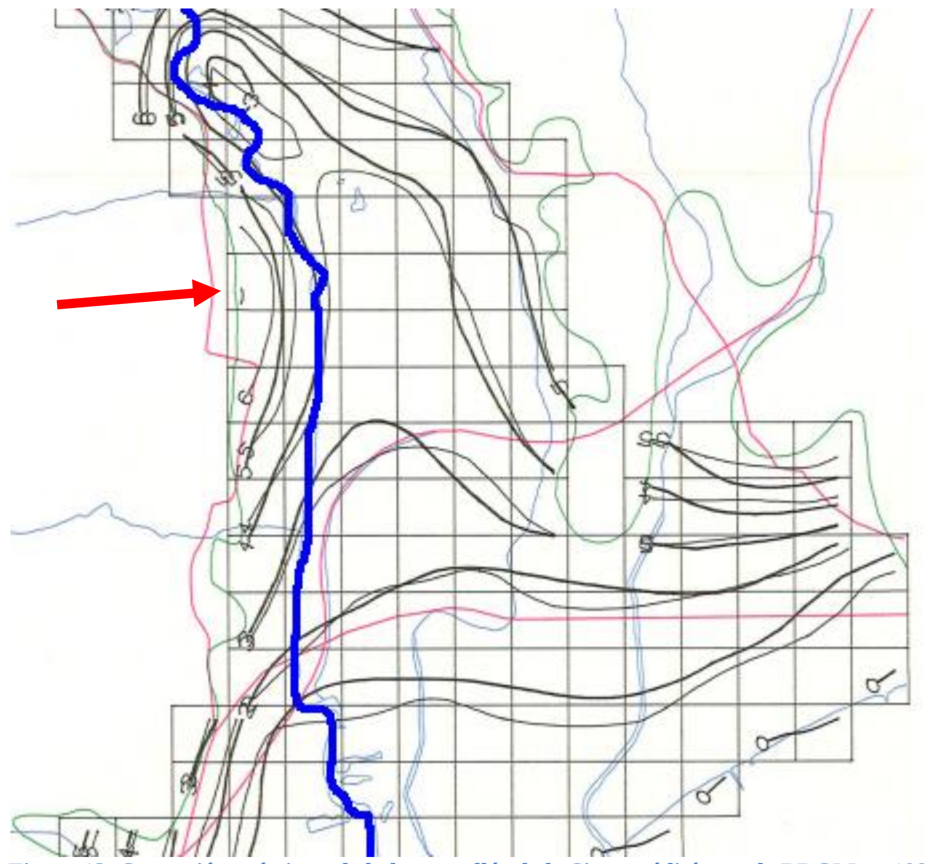


Figure 12. Carte piézométrique de la basse vallée de la Siagne, éditée par le BRGM en 1985

Les écoulements s'effectuent perpendiculairement aux courbes iso-pièzes, et ont tendance à être perpendiculaires à la Siagne qui draine la nappe. Cependant on remarque que les lignes d'écoulements sont perturbées par une recharge au niveau de l'affleurement avec le coteau.
Cette recharge se situe au niveau du lieu-dit " le Capitou ", voir flèche sur la carte piézométrique.

Ces entrées non négligeables doivent être dimensionnées. Pour cela, il faut dans un premier temps estimer les surfaces de ruissellement.
Nous avons utilisé les données d'Arlab, n'ayant pas encore les données provenant d'un Système d'Information Géographique.
Arlab ont estimé que les aires des versants, susceptibles d'alimenter l'aquifère par ruissellement, étaient de 7km².
Il sera intéressant de recalculer ses surfaces à partir du MNT et des fonctions hydrologiques d'ArcGIS.

Les pluies qui produisent ces ruissellements sont des événements rares. Ces événements pluvieux devront être étudiés à un pas de temps horaires.

Nous avons récolté les données pluviométriques horaires des pluviomètres de la station de Cannes aéroport, de Mandelieu et de Pégomas.
Des données provenant d'un pluviomètre à l'ouest des zones de ruissellements nous permettraient de faire une étude plus précise de la distribution de pluies. Il pourra être intéressant par la suite d'utiliser les polygones de Thiessen pour connaitre plus précisément la distribution des pluies sur les coteaux.
Les données pluviométriques proviennent du site internet de Météo-France : Climathèque.

Nous avons cependant pu estimer des volumes de ruissèlement en utilisant une feuille de calcul éditée par M. LABORDE, professeur d'hydrologie à Polytech'Nice-Sophia.
Cette feuille de calcul Excel permet de reconstituer une crue de ruissellement par la méthode de l'hydrogramme unitaire. *Référence : Mr LABORDE, hydrogramme unitaire, « H_U.xls »*
Cette feuille de calcul sera accompagnée de son manuel d'utilisation : *« Notice H_U.pdf »*.

Pour produire l'hydrogramme de crue, nous pouvons utiliser les coefficients de Montana délivrés par Météo-France qui nous permettent de caractériser le profil des pluies sur la région de Cannes-Mandelieu.

	2 ans	**5 ans**	**10 ans**	**20 ans**	**50 ans**	**100 ans**
a mm/h	28.29	36.57	42.23	47.62	54.69	59.90
a mm/min	257.19	382.73	452.47	508.34	577.85	623.85
b	0.54	0.57	0.58	0.58	0.58	0.57

Figure 13. Caractéristiques des paramètres de Montana pour la Station de Cannes Mandelieu (Pluie de 4 heures)

Nous allons estimer le volume d'alimentation de la nappe que peut produire une pluie de période de retour de 20 ans. Nous pouvons considérer une pluie de 4 heures avec une durée intense de 30 minutes. Ci dessous le profil des précipitations en double triangle de la pluie d'étude.



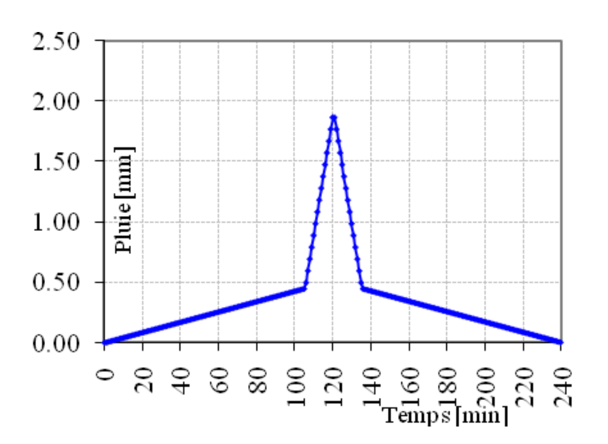



Figure 14. Profil des pluies produit par une pluie de période de retour de 20 ans, suivant le profil de DESBORDES

Connaissant la pluie brute, il faut désormais déterminer la pluie efficace, nous utilisons la méthode du SCS Curve Number qui permet de déterminer la partie de la pluie brute qui s'infiltre dans le sol. Le modèle de production développé par le Soil Conservation Service (SCS) relie le cumul de la pluie efficace Pe au cumul de la pluie brute Pb, par l'équation:

$$Pe = \frac{(Pb - Ia)^2}{(Pb - Ia) + S}$$

$$Ia = 0.2 \times S \qquad S = \frac{25400}{CN} - 254$$

I_a désignant les pertes intervenant en début d'événement et S la capacité de rétention en eau du sol (l'infiltration cumulée). Curve Number (CN) est fonction de la nature du sol et de l'antécédent pluviométrique. A partir de tables présentes dans la note de calcul, et du type de sol observé, nous choisissons un CN de 65.

Pour caractériser l'hydrogramme de crue, nous pouvons utiliser la méthode de l'hydrogramme unitaire triangulaire. Connaissant les caractéristiques de nos coteaux nous pouvons estimer un temps de montée de cet hydrogramme.
Le temps de montée dépend du temps de concentration de notre bassin. Le temps de concentration des eaux sur un bassin versant se définit comme la durée maximum nécessaire à une goutte d'eau pour parcourir le chemin hydrologique entre un point du bassin et l'exutoire de ce dernier, ici l'entrée de la nappe à l'affleurement des alluvions.
Nous pouvons ici estimer notre temps de montée en utilisant la formule de Ventura pour le temps de concentration. Le coteau ouest ayant une aire de 7km² pour une forte pente de 0.15 m/m (l'altitude de la crête du bassin est de l'ordre de 400m).

$$\text{Tm} = \frac{3}{8} \times \text{Tc}$$

$$\text{Tc} = 0.127 \times \sqrt{\frac{\text{A}}{\text{S}}}$$

Les temps s'exprimeront en minute, A étant la surface du bassin versant en km², et S la pente du bassin versant en m/m. Nous trouvons ici un temps de montée de 19.3 heures.

Pour finir, nous considérons un pourcentage nul de terrains imperméabilisés sur le coteau ouest.

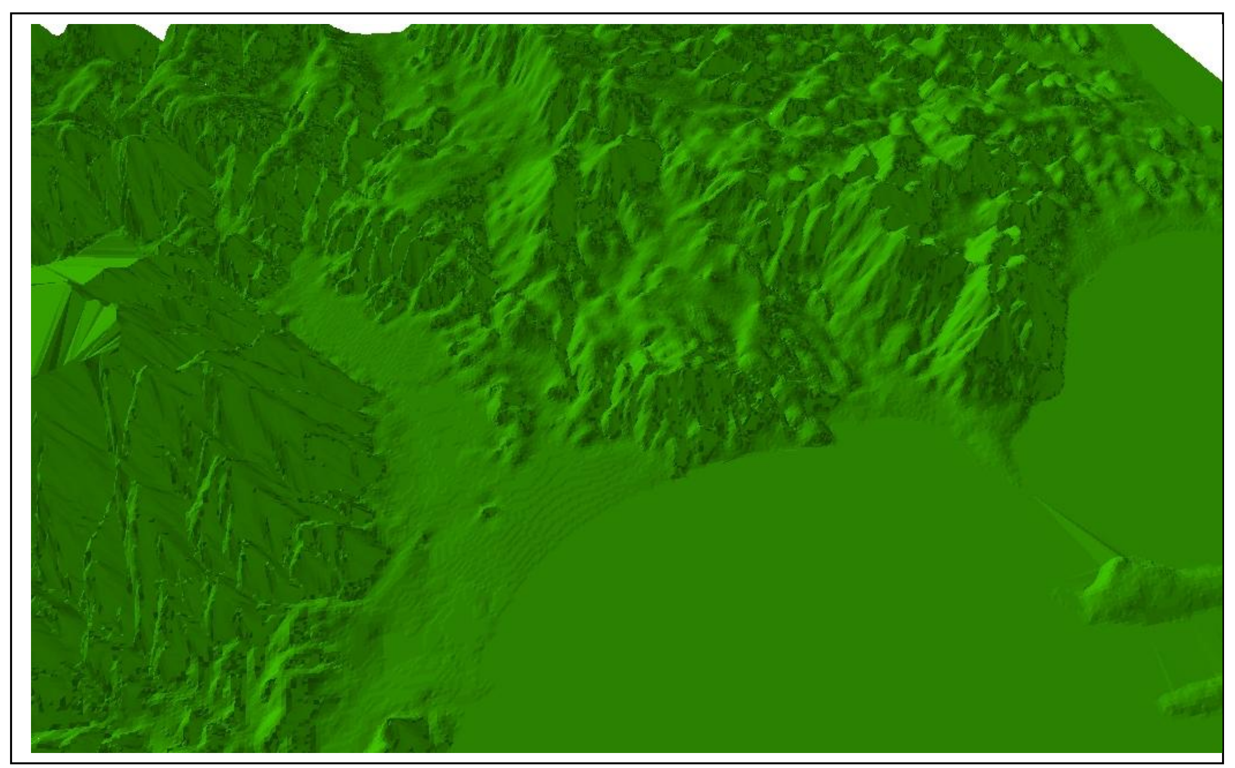


Figure 15. Cartographie 3D créée, permettant de visualiser les forts gradients des coteaux ouest

Ci dessous l'hydrogramme de crue que génère le coteau ouest.

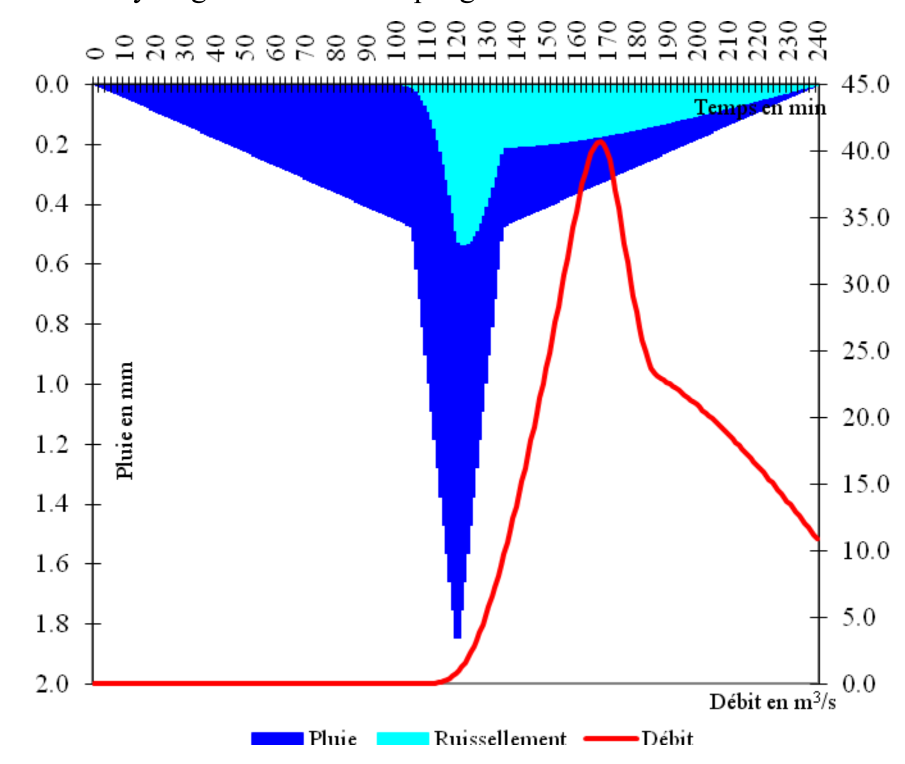


Figure 16. Hydrogramme de crue généré par une pluie de période de retour de 20 ans

Caractéristiques de la crue :		
Débit maximum :	**40.710**	m^3/s
(atteint au bout de :	**168**	mn)
Volume précité	**598 150**	m^3
Volume écoulé	**156 450**	m^3
Coefficient d'écoulement :	**26**	**%**

On remarque donc qu'une pluie de période de retour de 20 ans peut générer un volume de ruissellement 156 450 m^3 en 2h soit un débit moyen de 21.73 m^3/s.

En utilisant les pluies journalières sur la station de Pegomas (1990 à 2010), nous pouvons remarquer que les ruissellements apparaissent majoritairement de septembre à fin novembre. La loi de ruissellement du Soil Conservation System Curve Number (S.C.S. C.N.) à été appliqué sur Excel pour chaque événement pluvieux. En prenant l'exemple de l'année 1990, on remarque un ruissellement, sur les 7km² de coteaux, de 743m^3/an.

Cependant nous ne pouvons pas considérer que ce volume ruisselant s'infiltrera dans la nappe. Nous pouvons remarquer sur la carte IGN que des réseaux de drainage important ce sont formés. Le vallon de Gavellier par exemple, communique directement avec la Siagne et les ruissellements ne s'infiltreront donc pas dans la Siagne. Le Vallon de l'Estreille quant à lui se jette dans une carrière, et les ruissellements s'infiltreront dans ce cas dans la nappe.

Il serait intéressant de faire un repérage du terrain pour pouvoir estimer la part des systèmes de drainage influençant directement l'infiltration.

2. Les différents prélèvements

A) Inventaire des acteurs

Les prélèvements dans la nappe libre sont peu nombreux, mais certains d'entre eux sont très importants.

Le plus important site de pompage est situé dans le nord de la zone d'étude. Ces sites de pompages sont gérés par la Lyonnaise des Eaux et sont utilisés pour l'alimentation en eau potable. Ce sont des puits à drains rayonnants de très forte capacité situés sur les communes d'Auribeau et de Pégomas.
En été (juillet août) ces puits sont sollicités fortement (jusqu'à 500 l/s en continu soit 1 350 000 m3/mois). Sur l'ensemble de l'année, les débits prélevés sont assez variables (3 à 7 Mm3 soit 100 à 220 l/s.
La Lyonnaise des Eaux nous a fourni les données piézométriques des pompages (Auribeau et Pegomas) sur une période de 4ans avec un pas de temps de 3minutes.

Le volume annuel a atteint 4 258 416 m3 en 2003 (Q moyen 135l/s) débit maximum mensuel 600 000 m3 en août 2003, soit 224 l/s.

D'autres prélèvements importants ont lieu plus en aval pour alimenter la commune de Mandelieu. Ces prélèvements gérés par la Générale des Eaux sont situés directement dans la Siagne et non pas dans la nappe. Il est cependant intéressant d'en tenir compte. En effet ces importants pompages pourraient augmenter le drainage de la nappe par la Siagne.
Les données de pompage de la Générale des Eaux peuvent être disponibles sur demande. Ces pompages correspondent à l'exhaure de la station d'eau potable des Termes à Mandelieu.

Un usage agricole existe également. On note la présence d'environ 300 ha de cultures, dont une partie est irrigable à partir du canal de Beal. En été, la demande en eau correspondante en pointe, doit pouvoir atteindre 5mm/jour soit 15 000 m3/j (175 l/s).
Le BRGM avait pu recenser tous les forages et puits des particuliers, et spécialement ceux fortement sollicités pour l'irrigation. Malheureusement la campagne de collecte de données de 1965 n'est plus à jour.
Référence : BRGM, données hydrogéologiques sur le basse vallée alluviale de la Siagne , « 66-DSGR-A-020.pdf »

Nous avons pu prendre contact avec la Direction Départementale des Territoires et de la Mer (DDTM) de Nice. Mr. WEBER, Chef de cellule Eau Assainissement, nous a précisé qu'une convention venait d'être signée entre la DDTM et l'université de Nice, et qu'il pourrait ainsi nous informer sur les prélèvements de la nappe.

Pour obtenir l'ensemble des points de prélèvements de la nappe, il suffit de lui envoyer un polygone géo-référencé de notre zone d'étude (logiciel de Système d'Information Géographique : MapInfo).

B) Exemple du cône de rabattement sur un pompage

Le document BRGM, détaille les cônes de rabattements des drains rayonnants de la Lyonnaise des Eaux, et montre l'influence sur le débit de la Siagne qui se trouve à une cinquantaine de mètres des ouvrages.
Référence : BRGM, puits à drains rayonnants dans la vallée de la Siagne entre Auribeau et Pegomas, « 74-SGN-296-PRC.pdf »

Connaissant la transmisivité et la hauteur d'eau stabilisée hors pompage dans le puits, il nous serait possible de déterminer la conductivité hydraulique. Nous pourrions par la suite schématiser le cône de rabattement du puits de pompage. Pour cela il nous faudrait le diamètre exact du forage.

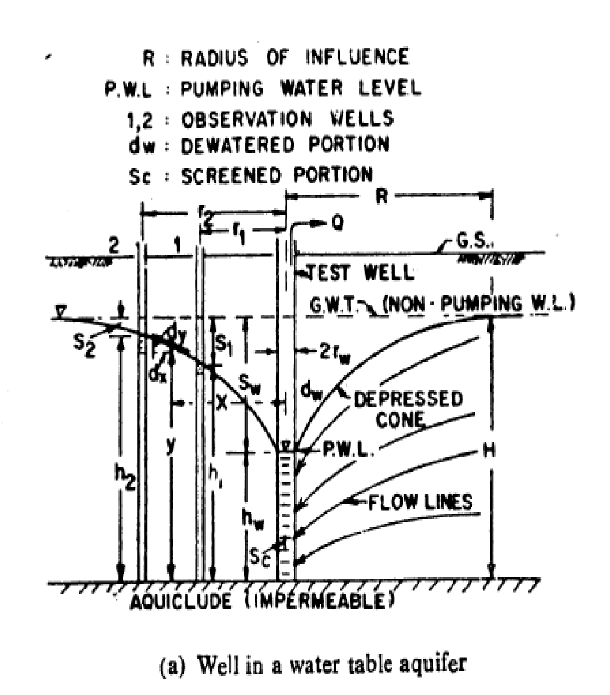


Figure 17. Représentation d'un cône de dépression produit par un puits dans un aquifère libre.




En utilisant ensuite cette formule, on peut déterminer le rayon d'influence R en mètres.

$$Q = \frac{\prod K \left(H^2 - h_w^{\ 2}\right)}{2.303 \log_{10} \frac{R}{r_w}}$$

Avec Q le débit nominal en m^3 / s, K la conductivité hydraulique en m/s, H la hauteur en m du sol jusqu'au substratum, hw le rabattement en mètres dans le puits et rw le rayon du tube de forage.

Connaissant le rayon d'influence, il serait possible de dimensionner un puits de recharge pour limiter ce cône de rabattement et donc limiter le drainage de la rivière par les pompages. Il serait intéressant de voir l'influence d'un puits de recharge utilisant les 15 Mm^3/an d'eau ultra-filtrée de la station Aquaviva.

Le rapport sera lié d'un document expliquant les phénomènes de puits de recharge et comment dimensionner ceux-ci.
Référence : Mr BANERJEE, professeur à l'Asian Institut of Technologie de Bangkok, « GroundWater Hydraulics and Image Well.ppt »

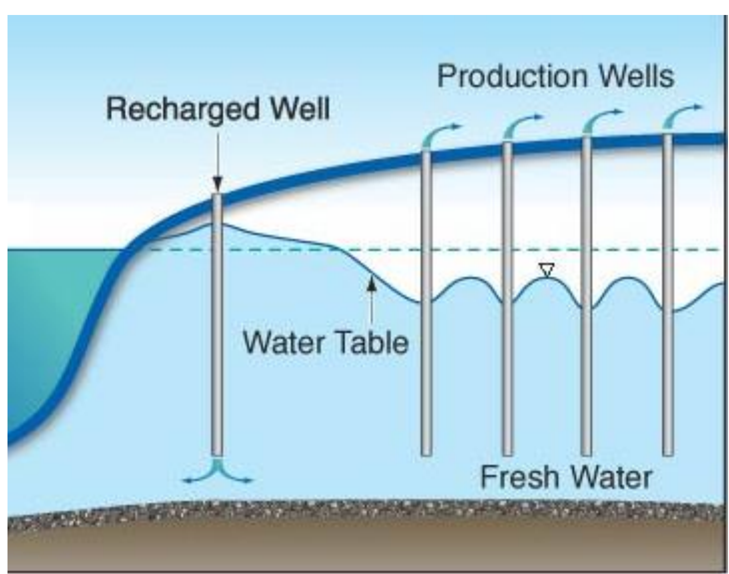


Figure 18. Puits de recharge permettant de limiter le rayon d'influence d'un cône de rabattement.

3. Les échanges nappe-rivière



Figure 19. Représentation des trois types d 'échanges nappes-rivière.

A partir des cartes piézométriques éditées par le BRGM on se rend bien compte que la rivière draine la nappe dans la haute partie de la basse vallée. Dans la dernière partie de la vallée, les courbes isopièzes font apparaitre des écoulements souterrains de direction Sud-Est. La Siagne semble être drainée par la nappe dans ses deux derniers kilomètres.

L'état du lit de la rivière est un facteur important pour comprendre les phénomènes d'échange. Le régime d'écoulement naturel de la rivière a été modifié par l'édification de petits barrages, comme celui du Béal, qui donnent au cours d'eau une vitesse extrêmement limitée et favorisent le dépôt de fines particules, et donc le colmatage. Seuls quelques tronçons de rivières sous le barrage du Beal ont un cours rapide où l'érosion semble l'emporter sur le colmatage. Des études du BRGM ont cependant montrées de forte alimentation par les lits de la rivière.

La compréhension des relations entre, eaux superficielles et souterraines, est très importante et intervient par exemple comme étape de calage dans les modélisations hydrogéologiques.
Des méthodes d'identification et de quantification des échanges, peuvent s'effectuer sous Système d'Information Géographique. Il faut au préalable connaitre avec précision les hauteurs d'eau de la rivière et de la nappe, ainsi que la perméabilité de l'aquifère et la surface d'échange.

Nous connaissons pour le moment, avec précisions les données des stations limnimetrique du Syndicat Intercommunal de la Siagne et Affluents (SISA) et de la direction Régionale de l'environnement de la région P.A.C.A. (DIREN).
Référence : SISA, Descriptions des stations et données météo, « ANNEXE_DES_STATIONS_SISA.pdf »

Pour plus de renseignements sur ces paramètres d'échange, il faudra recontacter le SISA.

III. Prochaines étapes du projet

1. Propositions d'investigations complémentaires

L'inventaire actuel des données n'est pas suffisamment exhaustif pour envisager de commencer la phase de modélisation numérique de la nappe. Il reste encore quelques étapes complémentaires à effectuer dont nous nous proposons de donner ici quelques pistes.

- Les coefficients de perméabilité sur l'ensemble de la basse vallée de la Siagne devront être déterminés avec précision dans le but de calculer l'infiltration directe des précipitations.

- Des données provenant d'un pluviomètre à l'ouest des zones de ruissèlements nous permettraient de faire une étude plus précise de la distribution de pluies. Il pourra être intéressant par la suite d'utiliser les polygones de Thiessen pour connaitre plus précisément la distribution des pluies sur les coteaux.

- Déterminer les limites des bassins versants, les pentes, les longueurs, puis les ruissèlements avec précision grâce au Modèle Numérique de Terrain (MNT) de la zone étudiée. Nous avons reçu un MNT du CRIGE (Centre Régional de l'Information Géographique). Celui-ci peut être utilisé pour cette étape. Toutefois il présente une limite. Le CRIGE sectionne par département, et notre zone d'étude se retrouve donc grignotée à l'ouest, ce qui risque d'influencer les résultats d'écoulements. Des données de MNT ont été également demandées à M. Andrès, professeur de SIG à Polytech'Nice-Sophia, et expert SIG à la communauté d'agglomération de Nice Côte d'Azur. Lorsqu'elles seront disponibles, elles pourront sans doute parer à la difficulté rencontrée avec les données du CRIGE.

  Un repérage sur le terrain devra être envisagé pour comprendre la relation des systèmes de drainage des coteaux. En effet il faudra distinguer les vallon communiquant avec la Siagne de ceux qui influenceront l'alimentation de la nappe par les ruissellements.

- Pour obtenir un inventaire exhaustif de l'ensemble des pompages de la nappe (industriels, agricoles, particuliers, etc.), avec les volumes annuels prélevés, on pourra s'adresser au DDTM. En leur fournissant un polygone géoréférencé Lambert II étendu de notre zone d'étude, ils seront en mesure de nous fournir ces précieuses informations.

- Si l'état de la connaissance du sous-sol est jugé insuffisant pour déterminer avec précision la profondeur du mur de l'aquifère, des sondages complémentaires peuvent être envisagés pour atteindre des profondeurs plus importantes (le mur de l'aquifère n'est souvent pas atteint par les forages existants, qui plongent en moyenne à 20m environ). Une trentaine de ces forages est concernée. On pourra choisir par exemple 10 forages parmi ces derniers, et poursuivre le forage sur une profondeur d'au moins 10m chacun.

  Cette éventuelle campagne de sondages pourra être réalisée pendant la période avril-juin 2011

- En ce qui concerne la piézométrie, nous disposons à l'heure actuelle des données dans le temps d'un seul piézomètre. Ce n'est pas suffisant. Il est nécessaire de connaitre la piézométrie à différents points de la nappe. Le réseau national ADES ne dispose que d'un seul piézomètre dans cette zone. Une source complémentaire d'information sur la piézométrie peut être encore recherchée. On pourra éventuellement trouver et utiliser une méthode mathématique d'interpolation pour déterminer la piézométrie, en croisant les données dans le temps de ce piézomètre avec les mesures recueillies par le BRGM en 1964. Celles-ci donnant la piézométrie sur l'ensemble du périmètre mais sur une courte période. Sinon on pourra lancer une campagne de mesure de la piézométrie sur des forages existants mais qui ne font actuellement pas l'objet d'un relevé de mesures régulier. On s'attachera à choisir des points stratégiques représentatifs de la nappe. Certains à proximité de la Siagne, d'autres plus éloignés, de part et d'autre du cours d'eau, et également répartis de l'amont à l'aval.

  Cette campagne de mesure pourra être réalisée aux mois d'avril et mai 2011

- Des essais de pompages peuvent être réalisés pour compléter ceux réalisés en 1969, et recouvrir ainsi une zone plus large. Nous proposons d'en effectuer une dizaine supplémentaire, répartis stratégiquement tout comme les points de mesure de la piézométrie. Afin de faciliter la mise en œuvre de cette campagne d'essais, nous mettons à disposition un guide des essais de pompages en annexe *(R. P. CHAPUIS, Service de l'aménagement et des eaux souterraines du ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec, Guide des essais de pompage et leurs interprétations, 2007)*

  Cette campagne d'essais de pompage pourra être réalisée et interprétée aux mois de mai et juin 2011.

La phase de modélisation comprendra les principales étapes suivantes :

- La construction du modèle maillé à partir des éléments géométriques et hydrodynamiques disponibles.

Cette première étape de la phase de modélisation, après le choix du logiciel, devrait pouvoir être entamée au mois de juillet 2011.

- L'étalonnage du modèle par comparaison des éléments calculés et des éléments observés et ajustement de certains paramètres. C'est à ce stade que le modèle prend toute sa valeur d'outil de compréhension du système hydrogéologique et de son fonctionnement. L'étalonnage en régime transitoire suppose la disponibilité de chroniques à un pas de temps compatible pour toutes les données temporelles. Plus l'étalonnage est fait sur une période longue, et plus la confiance qui peut être attribuée aux simulations est grande.

Cette étape devrait pouvoir être réalisée au cours du mois d'août 2011.

- Le calcul de la piézométrie et des flux pour différentes séquences hydro-climatologiques et pour différentes configurations de prélèvement, de stockage et de réinjection d'eau. Le modèle sera alors devenu un outil de gestion utilisable pour tester l'efficacité de ce projet d'alimentation artificielle de la nappe alluviale.

Cette étape devrait pouvoir être réalisée au mois de septembre 2011

- Une quatrième étape doit être prise en considération au delà de l'étalonnage initial. En effet, plus l'étalonnage est fait sur une période longue, et plus la représentativité du modèle peut-être considérée comme bonne puisque des configurations plus variées

auront été validées. C'est la raison pour laquelle il est nécessaire de vérifier périodiquement, a posteriori, que les prédictions du modèle dans la période écoulée correspondent bien aux mesures faites sur le terrain. Il s'agit d'une véritable maintenance, ou amélioration continue du modèle qui permet de confirmer sa validité et bien souvent d'améliorer progressivement la qualité des simulations en retouchant l'étalonnage.

Cette étape sera réalisée à partir du mois de septembre, elle doit être effectuée régulièrement (2 fois par mois environ) jusqu'à la fin du projet de modélisation pour améliorer sa qualité en continu.

2. Choix du logiciel

L'intérêt de la modélisation hydrogéologique est de quantifier les débits naturels transitant dans la nappe et de connaitre la distribution des perméabilités. Cela permet de reconstruire la piézométrie et ainsi mieux appréhender le fonctionnement hydrodynamique du système.

Une modélisation en régime transitoire peut être envisagée, pour connaitre l'évolution de la piézométrie en fonction du temps.

Deux logiciels majeurs de modélisation hydrogéologique peuvent être proposés pour réaliser l'étude de gestion de la nappe de la Siagne, ModFlow et FeFlow. Nous détaillerons brièvement les fonctions des ces deux logiciels de Schlumberger Water Services et de DHI.

Ces deux modèles à bases physiques, déterministes, sont capables de représenter des écoulements laminaires en trois dimensions dans des systèmes multicouches.

Ils résolvent la loi de Darcy et l'équation de continuité par la méthode des différences finies.

Pour se faire, l'aquifère doit être divisé en mailles quadrangulaires et des conditions aux limites doivent être imposées. Le nombre et la taille des mailles dépend de la précision attendue et de la nature des données sources.

La piézométrie calculée au centre de chaque maille tient compte des paramètres hydrodynamiques (conductivité hydraulique, porosité), des conditions aux limites (potentiel ou flux imposé, échange nappes-rivière et des conditions de recharge (infiltration, évapotranspiration, pompages).

FEFLOW (DHI) est une solution totalement intégrée de modélisation 3D d'eau souterraine avec éléments finis. C'est un logiciel qui permet des modélisations d'écoulement et de processus de transport en milieux poreux et en conditions saturées et non saturées.

Les points forts de ce logiciel sont sa prise en main rapide et son interface visuelle facilement compréhensible. Il intègre des outils de graphisme interactifs, une interface de Système d'Information Géographique, des outils de régionalisation et de visualisation de données.

Ces composants assurent un processus de travail efficace : élaboration du maillage d'éléments finis, allocation de propriétés de modèles et de conditions aux limites, conduite de la simulation et visualisation des résultats.

Le prix de la licence, à ce jour, pour un poste est de 3260 euros.

VISUAL MODFLOW (Schlumberger Water Services) est un logiciel qui a pour qualités premières d'être simple, modulaire et d'avoir été rendu fiable par une utilisation mondiale massive.

Ce logiciel n'est pas quant à lui coupler à une base SIG, et son interface graphique est moins agréable. Cependant il permet d'allouer efficacement des grilles de modèles et d'implanter les propriétés des limites. Le système d'extraction des données est aisé et facilite donc l'exploitation des résultas.

Le prix de la licence, à ce jour, pour un poste est de 1093 euros.

VISUAL MODFLOW semble convenir parfaitement pour la modélisation de la nappe alluviale de la Siagne.

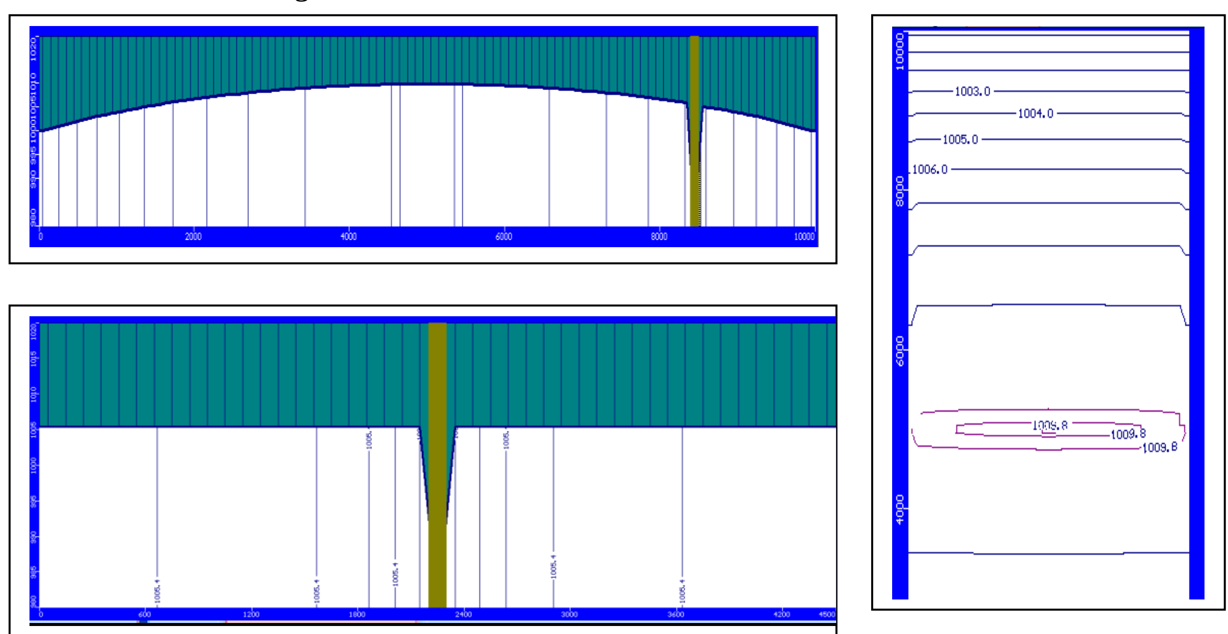


Figure 20. Prises de vue du logiciel ModFlow, lors d'une modélisation de pompage pour estimer les effets du cône de rabattement.

3. Estimation des coûts et planning prévisionnel

Nous donnons ci-dessous quelques estimations des coûts que les différentes étapes du projet peuvent engendrer. Ces valeurs datent de 1999 et ont été recueillies sur le site internet de Gilbert Castanet, sourcier (http://forage.puit.sourcier.pagesperso-orange.fr/index.htm). Toutefois nous mettons en garde que ces estimations sont partielles et approximatives, elles ne sont données qu'à titre indicatif. Un devis plus précis devrait être effectué par les professionnels du secteur pour chaque étape.

- **Campagne de sondage**

Mobilisation du matériel de sondage : 100€/h * 40h= 4000€
Déplacement sur chaque emplacement : …€ par emplacement * 10 emplacements =
Coût du mètre foré = 150€
Pour 10 forages de 30m coût = 150€ * 10 forages * 30m = 45000€
Toutefois on peut se contenter d'augmenter la profondeur de forages déjà existants, ce qui revient à :
Coût = 150 €* 10 forages * 10m = 15000€

Coût total de la campagne de sondage = 15000€ + 4000€ = 19000€ (+déplacement du matériel)

- **Essais de pompage et piézométrie**

Pompe et accessoires = 1500 €
Surveillance des sondages et essais de débit pendant 50 jours = …€ * 50j = …€
Etudes d'interprétation des essais, contrôle, coordination des travaux, établissement des cartes = 30j * …€ = …€

Coût total essais de pompage/piézométrie = 1500€ + **…€**

- **Licence de logiciel de modélisation**

Afin de limiter les coûts, comme nous l'avons vu précédemment, il est préférable d'opter pour le logiciel VISUAL MODFLOW, dont la licence est moins chère, et qui est tout à fait capable de modéliser notre système
Licence = 1093€ (Modflow)

- Stagiaire assurant le suivi du projet = 700€ * 7 mois = 4900€

Estimation du coût total de l'étude = 26500€ (+ déplacements du matériel, suivi des essais et études d'interprétation des essais)

Le tableau suivant synthétise le planning prévisionnel du projet, avec ses différentes étapes ainsi que les coûts précédemment évalués.

Etape	Coûts (€)	2011							
		Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept	Oct
Carte isohypse du mur de l'aquifère									
Campagne de sondages éventuelle	19000								
Campagne de mesures piézométriques									
Campagne d'essais de pompage + interprétation	1500								
Choix du logiciel pour la modélisation numérique	1100								
Construction de modèle maillé	4900								
Etalonnage du modèle									
Calculs de piézométrie pour différentes simulations									
Etalonnage périodique									
TOTAL	**26500**								

Figure 21. Planning prévisionnel de la poursuite du projet

Conclusion

Au fur et à mesure de l'avancement de l'étude, nous avons découvert de plus en plus de données concernant le fonctionnement de la nappe alluviale de la Siagne. Tout d'abord des données sur la géologie du terrain. Nous avons vu que l'aquifère est constitué essentiellement des alluvions, galets, graviers et sables, et que sous cet aquifère on note la présence d'une couche argileuse imperméable. Cette couche présente cependant beaucoup d'irrégularités à cause desquelles il est difficile d'établir son altitude. Or la cote du mur de l'aquifère est un élément essentiel pour la modélisation de la nappe.
Nous avons récolté au cours de notre enquête des données du comportement hydrodynamique de l'aquifère. Ces données sont intéressantes mais commencent à dater et à devenir désuètes.

Pour pouvoir dresser un modèle de la nappe, il faut connaitre quelles sont les entrées et sorties d'eau auxquelles elle est soumise. Les entrées sont dues aux précipitations et au débit du cours d'eau, alors que les sorties sont principalement dues aux pompages qui exploitent la nappe. Nous avons pu recueillir des données de précipitation à partir desquelles nous avons calculé l'infiltration dans la nappe, qu'elle soit par infiltration directe, ou qu'il y ait ruissellement venant des coteaux, ce qui nous a permis de construire le profil des pluies et hydrogrammes du système. Le principal prélèvement de la nappe est celui réalisé par la Lyonnaise des Eaux pour alimenter les populations en eau potable. Ces pompages sont effectués sur les communes d'Auribeau sur Siagne et de Pégomas et les données de volumes pompés sont disponibles. Véolia Eau effectue également des pompages pour la commune de Mandelieu, mais prélèvent leur eau directement dans la Siagne. Il existe de multiples autres pompages, tous n'étant pas répertoriés.

La poursuite du projet consistera dans un premier temps à améliorer la connaissance des données relatives à l'aquifère. Une meilleure connaissance de la profondeur du mur de l'aquifère et des paramètres hydrodynamiques complétés par de nouveaux essais de pompages seront profitables à une meilleure connaissance du système. Alors seulement pourra débuter la phase de modélisation proprement dite de la nappe alluviale.

Cette démarche des projets pédagogiques avec la Lyonnaise des Eaux nous a permis de mener une étude correspondant à de réels besoins. Nous avons été confrontés à différents obstacles dans la collecte de données qui sont représentatifs de la réalité professionnelle, dans laquelle tous les besoins d'une étude ne sont pas nécessairement disponibles, obstacles qui suscitent une réflexion pour trouver des solutions pragmatiques.